

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní

Porovnání přesnosti obrobených ploch při soustružení s C a Y osou

Precision Machined Surfaces Comparison During Turning with C  
and Y Axis

Student:

Bc. Daniel Grygar

Vedoucí práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Daniel Grygar**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: Porovnání přesnosti obrobených ploch při soustružení s C a Y osou  
Precision Machined Surfaces Comparison During Turning with C and Y Axis  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor kinematiky soustružení s C a Y osou.
2. Zhotovení experimentálních vzorků technologiemi soustružení s C a Y osou.
3. Analýza přesnosti zkušebních vzorků.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

### Seznam doporučené odborné literatury:

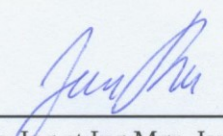
- [1] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
- [2] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 138 s., ISBN 978-80-248-2278-4.
- [3] SADÍLEK, M.; SADÍLKOVÁ Z. *Počítačová podpora procesu obrábění*. VŠB – TU Ostrava, 2012, 149 s., ISBN 978-80-248-2770-4.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 10.5.2017

Stygar  
podpis studenta



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 10.5.2017

.....  
Grygar  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Daniel Grygar

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Vyhlídce 30 Šternberk, 78501

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat především své rodině za podporu při studiu. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, kterými přispěl k tvorbě této diplomové práce. Poděkování patří také společnosti Haberkorn Ulmer s.r.o, za poskytnutí soustružnického centra a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat Ing. Radku Hrubému za pomoc při naměření analyzovaných vzorků.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. GRYGAR, D. *Porovnání přesnosti obrobených ploch při soustružení s C a Y osou: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 57s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

Diplomová práce se zabývá problematikou geometrické přesnosti při soustružení s C a Y osou, na soustružnicko-frézovacích CNC obráběcích centrech. Primárním cílem diplomové práce je analýza geometrické přesnosti na obrobených experimentálních vzorcích, a to technologiemi soustružení s C a Y osou. Na obrobených vzorcích se pomocí souřadnicového měřicího přístroje analyzují jednotlivé geometrické odchylky tvaru, směru a polohy a to především: rovinnost, rovnoběžnost, kolmost a sousost. Z naměřených dat bude možno porovnat tyto dvě metody soustružení a vyvodit závěry pro realizaci v praxi. Práce obsahuje nejprve teoretickou část, seznámení se s problematikou soustružení, kinematikou obráběcích center a geometrickými tolerancemi. V druhé části práce se zabývám samotným soustružením experimentálních vzorků na jednotlivých strojích a následnou analýzou geometrických odchylek. Závěrem jsou zhodnoceny obě metody soustružení pro realizaci v praxi.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. GRYGAR, D. *Precision Machined Surfaces Comparison During Turning with C and Y Axis: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 57s. Thesis head: Sadílek, M.

This diploma thesis deals with the phenomenon of geometrical precision in turning with C and Y axis, on turning and milling CNC machining centres. The primary goal of the diploma thesis is to analyse the geometrical precision on the machined experimental samples created using C and Y axis milling technologies. The geometric deviations of shape, direction and position are analysed on the machined samples using the coordinate measuring instrument, namely Flatness, parallelism, perpendicularity and alignment. It is possible to compare these two methods of turning and therefore draw conclusions for implementation in practice using the measured data. In the theoretical part, the work introduces the turning phenomenon as well as the coordinate system of machining centres and geometric tolerances. In the second part of my thesis I analyse experimental samples created on individual turning machines and their geometrical deviations. I evaluate both turning methods for implementation in practice in the conclusion.

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| Obsah.....   | 7  |
| Seznam použitých značek a symbolů.....                       | 10 |
| Úvod.....  | 13 |
| 1. Rozbor řešené problematiky .....                          | 14 |
| 1.1 Soustružení.....   | 14 |
| 1.2 Souřadnicový systém soustružnických center .....         | 15 |
| 1.2.1 Soustružení pomocí X, Z osy .....                      | 15 |
| 1.2.2 Soustružení pomocí X, Z, C osy .....                   | 16 |
| 1.2.3 Soustružení pomocí X, Y, Z, C osy .....                | 17 |
| 2. Technická data porovnávaných soustružnických center ..... | 18 |
| 2.1 Soustružnické centrum DMG MORI NLX 2500MC/700 .....      | 18 |
| 2.2 Soustružnické centrum DMG MORI NLX 2500Y/700.....        | 19 |
| 3. Makrogeometrie povrchu .....                              | 20 |
| 3.1 Odchylka rovinnosti.....                                 | 21 |
| 3.2 Odchylka rovnoběžnosti .....                             | 21 |
| 3.3 Odchylka kolmosti .....                                  | 22 |
| 3.4 Odchylka soustřednosti a souososti .....                 | 23 |
| 4. Zhotovení experimentálních vzorků .....                   | 24 |
| 4.1 Experimentální vzorek.....                               | 24 |
| 4.1.1 Polotovar .....  | 25 |
| 4.1.2 Frézovací nástroj .....                                | 26 |
| 4.2 Soustružení analyzovaného vzorku .....                   | 27 |
| 4.2.1 Programování v CAM systému .....                       | 27 |
| 4.2.2 Postup soustružení.....                                | 28 |
| 5. Analýza přesnosti zkušebních vzorků .....                 | 29 |
| 5.1 Výpočet nejistoty měření .....                           | 30 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.1.1 | Aritmetický průměr .....   | 30 |
| 5.1.2 | Směrodatná odchylka .....  | 31 |
| 5.1.3 | Hrubá chyba $H_n$ .....  | 31 |
| 5.1.4 | Standardní nejistota typu A .....                                    | 32 |
| 5.1.5 | Standardní nejistota typu B1 .....                                   | 33 |
| 5.1.6 | Standardní nejistota typu B2 .....                                   | 33 |
| 5.1.7 | Standardní nejistota typu B .....                                    | 34 |
| 5.1.8 | Standardní nejistota typu C .....                                    | 34 |
| 5.1.9 | Rozšířená standardní nejistota typu C .....                          | 35 |
| 6.    | Výsledky měření .....  | 36 |
| 6.1   | Geometrické odchylky kolmosti .....                                  | 36 |
| 6.1.1 | Kolmost Y-osa axiální soustružení .....                              | 36 |
| 6.1.2 | Kolmost Y-osa radiální soustružení .....                             | 37 |
| 6.1.3 | Kolmost před seřízením soustružnického centra (C + Z osa) .....      | 37 |
| 6.1.4 | Kolmost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa) .....         | 37 |
| 6.2   | Geometrické odchylky rovnoběžnosti .....                             | 38 |
| 6.2.1 | Rovnoběžnost Y-osa axiální soustružení .....                         | 38 |
| 6.2.2 | Rovnoběžnost Y-osa radiální soustružení .....                        | 38 |
| 6.2.3 | Rovnoběžnost před seřízením soustružnického centra (C + Z osa) ..... | 38 |
| 6.2.4 | Rovnoběžnost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa) .....    | 39 |
| 6.3   | Geometrické odchylky rovinnosti .....                                | 39 |
| 6.3.1 | Rovinnost Y-osa axiální soustružení .....                            | 39 |
| 6.3.2 | Rovinnost Y-osa radiální soustružení .....                           | 40 |
| 6.3.3 | Rovinnost před seřízením soustružnického centra (C + Z osa) .....    | 40 |
| 6.3.4 | Rovinnost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa) .....       | 41 |
| 6.4   | Geometrické odchylky sousosti .....                                  | 42 |
| 6.4.1 | Souosost Y-osa axiální soustružení .....                             | 42 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.4.2 | Souosost Y-osa radiální soustružení .....   | 42 |
| 6.4.3 | Souosost před seřízením soustružnického centra (C + Z osa).....   | 43 |
| 6.4.4 | Souosost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa).....  | 43 |
| 7.    | Grafické porovnání přesnosti .....  | 44 |
| 7.1   | Porovnání přesnosti obrobených ploch před a po seřízení soustružnického centra DMG MORI NLX 2500MC/700..... | 44 |
| 7.1.1 | Porovnání odchylky kolmosti .....   | 45 |
| 7.1.2 | Porovnání odchylky rovnoběžnosti.....   | 46 |
| 7.1.3 | Porovnání odchylky rovinnosti .....   | 47 |
| 7.1.4 | Porovnání odchylky souososti.....   | 48 |
| 7.2   | Porovnání přesnosti obrobených ploch při soustružení s C a Y osou.....                                      | 49 |
| 7.2.1 | Porovnání odchylky kolmosti .....   | 50 |
| 7.2.2 | Porovnání odchylky rovnoběžnosti.....   | 51 |
| 7.2.3 | Porovnání odchylky rovinnosti .....   | 52 |
| 7.2.4 | Porovnání odchylky souososti.....   | 53 |
| 8.    | Závěry pro realizaci v praxi .....  | 54 |
| 8.1   | Geometrické odchylky před a po revizi soustružnického centra .....  | 54 |
| 8.2   | Geometrické odchylky při použití Y a C osy .....  | 54 |
| 9.    | Závěr .....   | 55 |
| 10.   | Seznam použité literatury .....   | 56 |

## Seznam použitých značek a symbolů

| Zkratka     | Název  |
|-------------|--|
| CNC         | computerized numerical control (počítačové číslicové řízení) |
| CAM         | Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)  |
| NC          | numerical control (číslíkové řízení)                         |
| ČSN         | Česká technická norma  |
| CMM         | coordinate measuring machine (Souřadnicový měřicí přístroj)  |
| VBD         | Vyměnitelná břitová destička                                 |
| $V_c$       | Řezná rychlost [mm/ot]                                       |
| $a_p$       | Hloubka záběru třísky [mm]                                   |
| $n$         | Otáčky [ot/min]  |
| $n_{\max}$  | Max. otáčky vřetene [ot/min]                                 |
| $n_z$       | Posuv na zub [mm]  |
| $n_u$       | Otáčky rotačního upínače [ot/min]                            |
| $n_{u\max}$ | Max. otáčky rotačního upínače [ot/min]                       |
| CSS         | Constant surface speed (konstantní obvodová rychlost)        |
| $\bar{x}$   | Aritmetický průměr   |
| $x_n$       | n-tý kus měření  |
| $s(x)$      | Směrodatná odchylka  |
| $n$         | Počet měření   |
| $x_i$       | Jednotlivé naměřené hodnoty veličiny X                       |
| $\delta$    | Relativní chyba způsobená nepřesností dotykové sondy         |
| $\delta_2$  | Relativní chyba měřicího stroje                              |
| $u_{B1}$    | Standardní nejistota typu B1                                 |
| $u_{B2}$    | Standardní nejistota typu B2                                 |
| $u_A$       | Standardní nejistota typu A                                  |
| $u_B$       | Standardní nejistota typu B                                  |
| $k_u$       | Koeficient rozšíření   |
| $u_C$       | Standardní nejistota typu C                                  |
|             |  |

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b><math>K_{20Yax}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek kolmosti pro všech 20 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                             |
| <b><math>K_{20Yrad}</math></b>  | Aritmetický průměr odchylek kolmosti pro všech 20 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                            |
| <b><math>K_{12Cpred}</math></b> | Aritmetický průměr odchylek kolmosti pro všech 12 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí C osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)      |
| <b><math>K_{12Zpred}</math></b> | Aritmetický průměr odchylek kolmosti pro všech 12 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Z osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)     |
| <b><math>K_{20Cpo}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek kolmosti pro všech 20 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí C osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)         |
| <b><math>K_{20Zpo}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek kolmosti pro všech 20 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Z osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)        |
| <b><math>R_{10Yax}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek rovnoběžnosti pro všech 10 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                        |
| <b><math>R_{10Yrad}</math></b>  | Aritmetický průměr odchylek rovnoběžnosti pro všech 10 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                       |
| <b><math>R_{6Cpred}</math></b>  | Aritmetický průměr odchylek rovnoběžnosti pro všech 6 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí C osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)  |
| <b><math>R_{6Zpred}</math></b>  | Aritmetický průměr odchylek rovnoběžnosti pro všech 6 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Z osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700) |
| <b><math>R_{10Cpo}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek rovnoběžnosti pro všech 10 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí C osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)    |
| <b><math>R_{10Zpo}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek rovnoběžnosti pro všech 10 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Z osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)   |

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b><math>RI_{20Yax}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek rovinnosti pro všech 20 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                         |
| <b><math>RI_{19Yrad}</math></b>  | Aritmetický průměr odchylek rovinnosti pro všech 19 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                        |
| <b><math>RI_{12Cpred}</math></b> | Aritmetický průměr odchylek rovinnosti pro všech 12 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí C osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)  |
| <b><math>RI_{12Zpred}</math></b> | Aritmetický průměr odchylek rovinnosti pro všech 12 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Z osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700) |
| <b><math>RI_{19Cpo}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek rovinnosti pro všech 19 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí C osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)     |
| <b><math>RI_{18Zpo}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek rovinnosti pro všech 18 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Z osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)    |
| <b><math>S_{5Yax}</math></b>     | Aritmetický průměr odchylek souososti pro všech 5 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                           |
| <b><math>S_{5Yrad}</math></b>    | Aritmetický průměr odchylek souososti pro všech 5 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Y osy (soustruženo ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700)                          |
| <b><math>S_{3Cpred}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek souososti pro všechny 3 naměřené hodnoty, soustruženo axiálně pomocí C osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)   |
| <b><math>S_{3Zpred}</math></b>   | Aritmetický průměr odchylek souososti pro všechny 3 naměřené hodnoty, soustruženo radiálně pomocí Z osy, před seřízením soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)  |
| <b><math>S_{5Cpo}</math></b>     | Aritmetický průměr odchylek souososti pro všech 5 naměřených hodnot, soustruženo axiálně pomocí C osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)       |
| <b><math>S_{5Zpo}</math></b>     | Aritmetický průměr odchylek souososti pro všech 5 naměřených hodnot, soustruženo radiálně pomocí Z osy, po seřízení soustružnického centra (soustruženo na katedře 346 na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700)      |

## Úvod

Třískové obrábění je v dnešní době velice rozšířená technologie, zejména díky neustálému výzkumu a vývoji soustružnických a frézovacích center. Ještě před několika lety bylo nepředstavitelné vytvořit složitou součást pouze na jedno upnutí polotovaru. Dnes to však možné je, a to především díky sofistikovaným technologiím, kterými jsou například automatická výměna nástroje či obrobku, možnosti soustružení ve více osách, automatizace kontroly nástroje, použití druhého vřetene nebo možnost použití rotačních upínačů pro frézování na obráběcích centrech.

Za jednu z hlavních inovací dnešní doby se však dá považovat víceosé soustružení. Přidáním ke stávajícím X a Z osám obráběcího stroje další dvě. A těmi jsou rotační C osa a lineární Y osa. S tím souvisí i možnost použití integrovaných rotujících nástrojů, díky kterým se nám otevírají nové technologické možnosti a také větší produktivita a hospodárnost stroje.

Ke stávajícím soustružnickým operacím je pak k dispozici velmi široká škála obráběcích operací nerotačních povrchů, jako je nesouosé vrtání, vyvrtávání či nesouosé frézování.

Právě těmito nerotačními frézovacími operacemi na soustružnickém centru se bude zabývat tato diplomová práce, a to především porovnáním geometrické přesnosti mezi soustružením pomocí rotační C osy a lineární Y osy.



# 1. Rozbor řešené problematiky

V této části práce bych chtěl připomenout základní pojmy a dělení soustružnických center z hlediska jejich druhu, počtu os ve kterých je možno soustružit a kinematiky soustružení v jednotlivých osách.

## 1.1 Soustružení

Soustružení je metoda třískového obrábění, při které je materiál odebírán mechanickým působením nástroje na rotující obrobek, který je upnut ve sklíčidle. Ve strojírenství je soustružení nejpoužívanější metoda obrábění materiálu, a to především díky své rychlosti, přesnosti a nenáročnosti. Používá se zejména pro zhotovení rotačních tvarů.

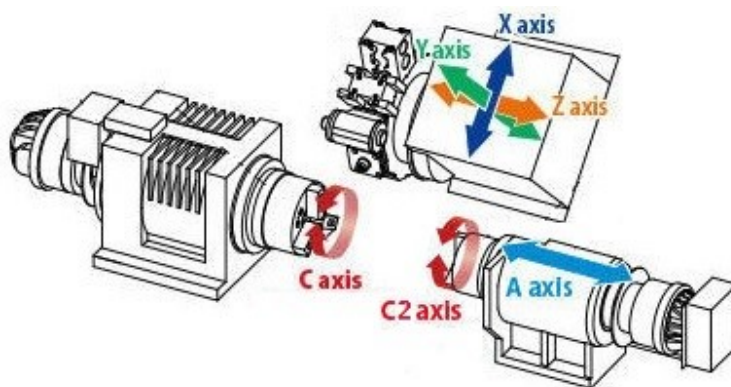
V dnešní době jsou již na ústupu klasické soustruhy, které nebyly řízeny počítačem. Postupně jsou nahrazovány moderními obráběcími centry. Na obr. 1.1 můžete vidět jedno ze dvou soustružnicko-frézovacích CNC obráběcích center, jehož přesnost byla analyzována v této diplomové práci.



*Obr. 1.1 Soustružnicko-frézovací CNC obráběcí centrum NLX2500Y/700 od firmy DMG MORI [10]*

## 1.2 Souřadnicový systém soustružnických center

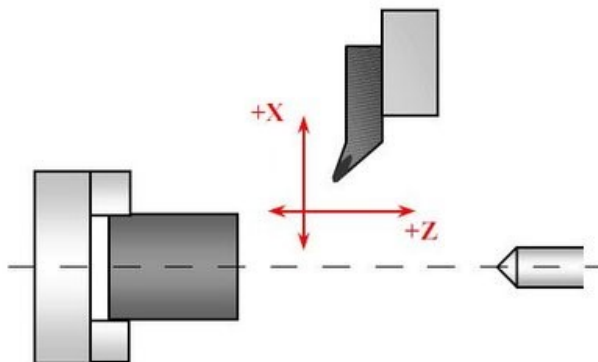
Základními osami každého soustruhu je osa X, která je souběžná s čelní upínací plochou a osa Z, která je souběžná s osou vřetene. Soustruhy vybavené jen těmito dvěma osami však měly menší využitelnost než ty, které známe dnes pod pojmem CNC. Tyto moderní stroje jsou totiž mimo jiné schopny soustružit ve více osách. Jsou to například rotační osy (C, C2), lineární osy (Y, A) nebo úhlová osa (B). Přidáním každé jednotlivé osy se nám otevírají nové možnosti soustružení (nesouosé frézování, nesouosé vrtání, broušení, automatické upnutí do druhého vřetene, vrtání děr pod úhly mimo osu atd.). Pohyby jednotlivých os můžete vidět na obr. 1.2. [1] [13]



Obr. 1.2 Rozdělení os při soustružení [8]

### 1.2.1 Soustružení pomocí X, Z osy

Starší (NC) soustruhy jsou vybaveny pouze osami X, Z (obr. 1.3). Souřadnicemi jsou tedy popsány polohy pouze ve dvourozměrném souřadnicovém systému. V ose Z soustruhu se pohybuje nástroj v ose obrobku a to většinou pohybem ve směru + míří od obrobku a pohybem ve směru - míří k obrobku. Osa X se vztahuje na průměr obrobku, přičemž pohyb ve směru + míří od obrobku a ve směru - míří do středu obrobku (kolmo na osu). [1] [11]



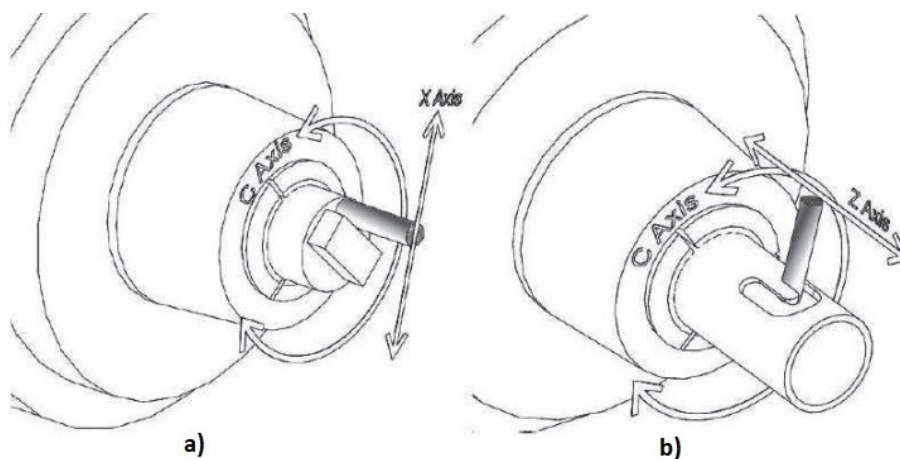
Obr. 1.3 Soustružení v souřadném systému X, Y os

### **Možnosti stroje:**

- obrábět čelní rovinné plochy obrobku,
- obrábět vnější i vnitřní válcové, kuželové i tvarové plochy,
- obrábět zápichy (vnější, vnitřní, čelní),
- upichovat,
- vrtat, vyvrtávat a soustružit závity, pouze však v ose obrobku,
- vroubkovat, válečkovat, hladit a leštit [1]

### **1.2.2 Soustružení pomocí X, Z, C osy**

Doplněním soustruhů o řízenou osu C, která umožňuje přesné natáčení kolem osy Z do požadované polohy, a doplněním o rotační upínače, jsme schopni frézovat z čela obrobku rovinné či jiné tvary (Obr. 1.4 a)), nebo radiálně frézovat do trub. (obr. 1.4 b)). [1] [11] [13]



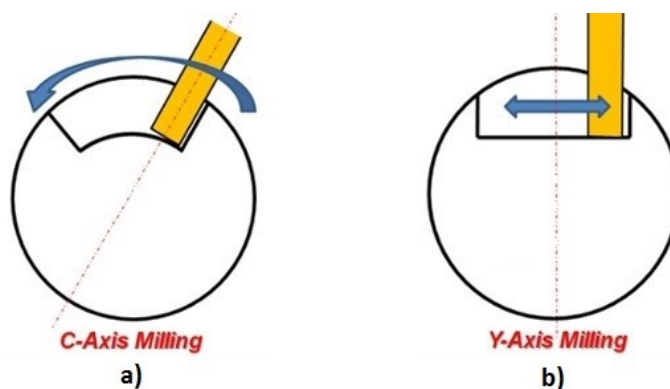
*Obr. 1.4 a) Axiální frézování s C osou, b) Radiální frézování s C osou [11]*

### **Možnosti stroje oproti obrábění v X, Z osách:**

- frézování,
- broušení,
- vrtání z čela mimo osu obrobku

### 1.2.3 Soustružení pomocí X, Y, Z, C osy

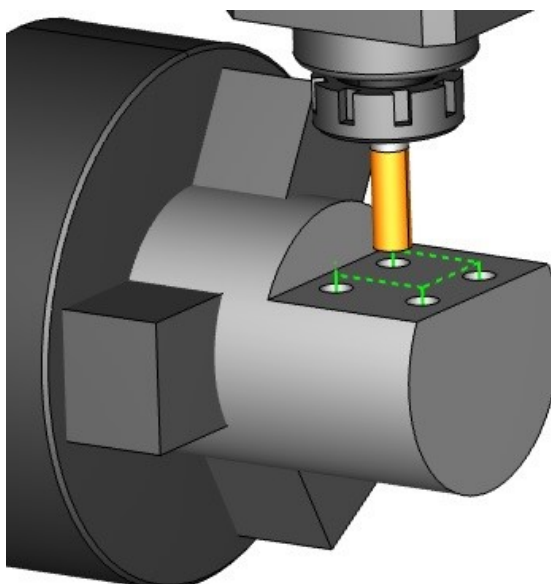
Lineární osa Y, je dalším krokem k modernizaci obráběcího centra. Díky této ose je možno pomocí rotačních upínačů frézovat rovinné či jiné plochy, a to i radiálně, což není bez této osy možno provést. Na obr. 1.5 a) můžete vidět radiální frézování jen pomocí rotační osy C. Je zde patrné, že není možno radiálním frézováním vytvořit rovinnou plochu. Na obr. 1.5 b) vidíte radiální frézováním pomocí Y osy. Zde je možno vytvářet rovinné plochy i radiálním frézováním. [1]



Obr. 1.5 a) Radiální frézování s C osou, b) Radiální frézování s Y osou [9]

#### **Možnosti stroje oproti obrábění v X, Z, C osách:**

Na obr. 1.6 můžete vidět jednu z mnoha výhod, kterou nabízí osa Y. Můžete zde vidět vrtání, (frézování, broušení) otvorů radiálně upnutým vrtákem. Vrtání probíhá mimo osu obrobku, což by nebylo bez použití osy Y možné. [16]



Obr. 1.6 Možnosti soustružení s Y osou [16]

## **2. Technická data porovnávaných soustružnických center**

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, frézování vzorků probíhalo na dvou obráběcích centrech, a to na soustružnicko-frézovacím CNC obráběcím centru DMG MORI NLX 2500MC/700, kde bylo frézování rovinných ploch prováděno pomocí rotační osy C a lineární osy X. Druhým obráběcím centrem je soustružnicko-frézovací CNC obráběcí centrum DMG MORI NLX 2500Y/700, kdy bylo frézování rovinných ploch prováděno pomocí lineární osy Y.

### **2.1 Soustružnické centrum DMG MORI NLX 2500MC/700**

Obráběcí centrum je vybaveno lineárními osami X, Z a rotační osou C.

#### **Technická data:**

- Točný průměr nad ložem 787 mm
- Oběžný průměr nad příčným suportem 541 mm
- Maximální průměr soustružení 366/356 mm
- Standardní průměr soustružení 271/275 mm
- Maximální délka soustružení 705 mm
- Maximální průchod vřetenem 80 mm
- Pojezdy v osách X / Z 260 / 795 mm
- Otáčky vřeten 4000 min<sup>-1</sup>
- Minimální spínací úhel vřetena 0,001 ° [5]



## 2.2 Soustružnické centrum DMG MORI NLX 2500Y/700

Obráběcí centrum je oproti výše zmíněnému vybaveno i lineární osou Y, která umožňuje frézovat, vrtat či brousit radiálně mimo osu obrobku. A to díky rotačním upínačům.

### **Technická data:**

- Točný průměr nad ložem 920 mm
- Oběžný průměr nad příčným suportem 742 mm
- Maximální průměr soustružení 366/356 mm
- Standardní průměr soustružení 271/275 mm
- Maximální délka soustružení 705 mm
- Maximální průchod vřetenem 80 mm
- Pojezdy v osách X / Y / Z 260 /  $\pm 50$  / 795 mm
- Otáčky vřeten 4000 min<sup>-1</sup>
- Minimální spínací úhel vřetena 0,001 ° [5]

### 3. Makrogeometrie povrchu

Tato kapitola je uvedena s ohledem na výzkum.

Vzhledem ke svým jmenovitým hodnotám vykazují skutečné plochy určité odchylky. Proto jsou zavedeny určité geometrické tolerance definující toleranční pole, ve kterém se musí nacházet skutečný prvek součásti. Základní dělení geometrických tolerancí je na obr. 3.1. Patří sem geometrické tolerance tvaru, směru, polohy, házení. Odchylky geometrie jsou výsledkem nepřesnosti výrobního procesu a musí být kontrolovány a měřeny.

V této teoretické části se zaměřím především na odchylky rovinnosti, rovnoběžnosti, kolmosti a souososti, protože právě tyto čtyři geometrické tolerance byly analyzovány na obrobených vzorcích. [4] [16]

| Geometrické tolerance |                           | Značka |
|-----------------------|---------------------------|--------|
| <b>Tvaru</b>          | Přímosti                  | —      |
|                       | Rovinnosti                |        |
|                       | Kruhovitosti              |        |
|                       | Válcovitosti              |        |
|                       | Tvaru profilu             |        |
|                       | Tvaru plochy              |        |
| <b>Směru</b>          | Rovnoběžnosti             | //     |
|                       | Kolmosti                  |        |
|                       | Sklonu                    |        |
| <b>Polohy</b>         | Umístění                  |        |
|                       | Soustřednosti a souososti |        |
|                       | Souměrnosti               |        |
| <b>Házení</b>         | Kruhového                 |        |
|                       | Celkového                 |        |

Obr. 3.1 Geometrické tolerance a jejich značení [18]

### 3.1 Odchylka rovinnosti

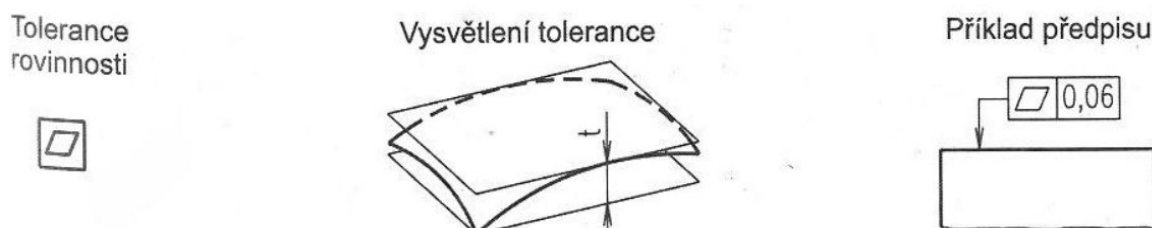
Odchylka rovinnosti patří do skupiny odchylek geometrického tvaru. Je to hodnota zobrazující skutečné vychýlení profilu součásti od jeho jmenovitého profilu.

Odchylka geometrického tvaru je největší odchylka bodů skutečné plochy, určená ve směru normály k jmenovité ploše na vztaženém úseku. Pro hodnocení tvarové přesnosti je normou určeno kritérium obalových prvků. Na obr. 3.2 je zobrazena značka tolerance rovinnosti (zleva), vysvětlení tolerance a příklad předpisu na výkrese. [4][1]

**Odchylka rovinnosti (TFE)** je největší vzdálenost skutečné roviny od obalové roviny. Definice obalové roviny odpovídá vždy jen jedné ze tří možných poloh.

**Obalová rovina se dotýká kontrolované plochy:**

- ve třech nejvyšších bodech,
- v jednom nejvyšším bodě rovnoběžně s rovinou procházející třemi nejnižšími body,
- ve dvou nejvyšších bodech rovnoběžně se spojnici dvou nejnižších bodů reliéfu plochy.



Obr. 3.2 Tolerance rovinnosti [18]

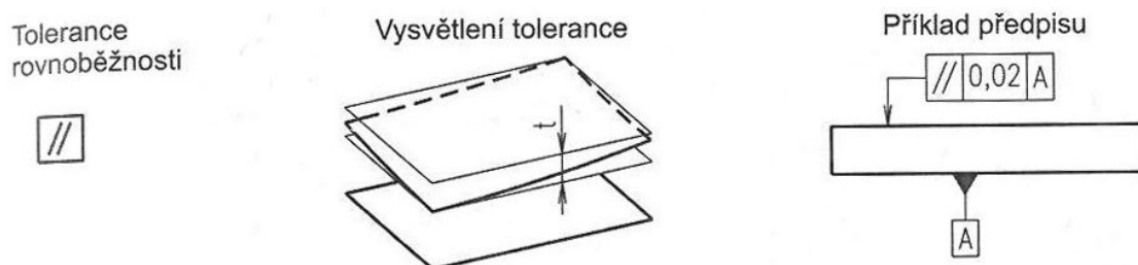
### 3.2 Odchylka rovnoběžnosti

Odchylka rovnoběžnosti patří, stejně jako odchylka kolmosti, do skupiny geometrických odchylek směru. Tyto geometrické tolerance jsou rozhodující pro funkčnost strojů, např. rovnoběžnost vodících ploch nebo kolmost osy vřetena ke stolu frézky. [4][1]

**Odchylka rovnoběžnosti se může měřit na:**

- dvou rovinách,
- přímce a rovině,
- dvou přímkách v rovině,
- dvou přímkách v prostoru.

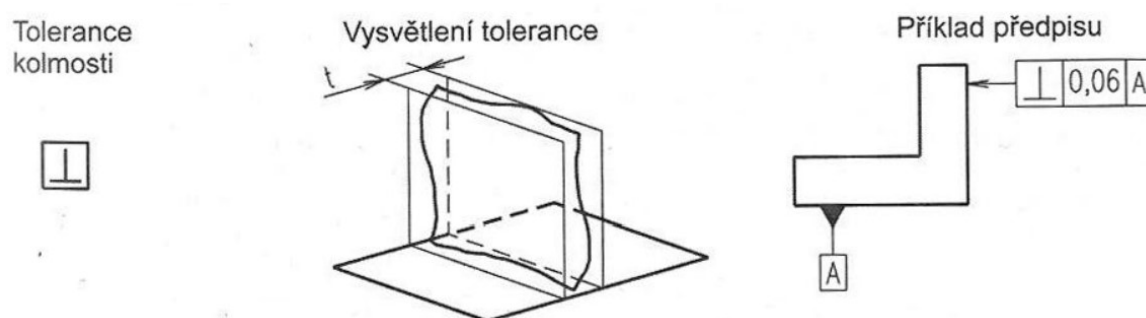
**Odchylka rovnoběžnosti dvou rovin EPA** se dá chápat jako rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti mezi rovinami v rozsahu vztažného úseku. Na obr. 3.3 je zobrazena značka tolerance rovnoběžnosti (zleva), vysvětlení tolerance a příklad předpisu na výkrese.



Obr. 3.3 Tolerance rovnoběžnosti [18]

### 3.3 Odchylka kolmosti

**Odchylka kolmosti dvou rovin EPR** je odchylka (prvého) úhlu mezi rovinami, vyjádřena v lineárních jednotkách na délce vztažného úseku součásti. Na obr. 3.4 je zobrazena značka tolerance kolmosti (zleva), vysvětlení tolerance a příklad předpisu na výkrese. [4][1]



Obr. 3.4 Tolerance kolmosti [18]

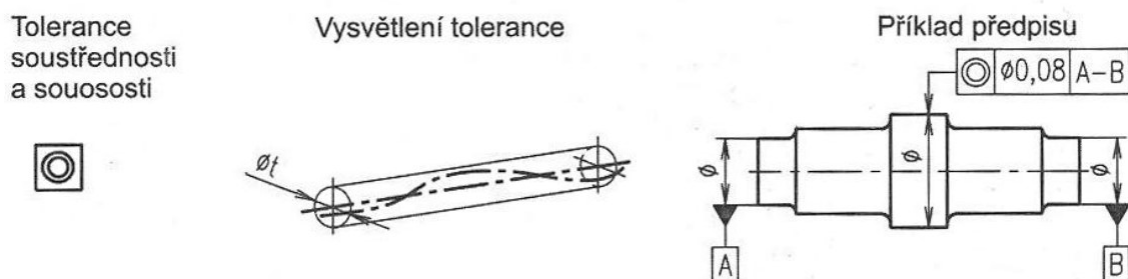
### 3.4 Odchylka soustřednosti a souososti

Odchylka soustřednosti a souososti patří do skupiny geometrických odchylek směru. Na tyto odchylky má velký význam interpretace základen, ze kterých následně určíme geometrický souřadnicový systém na součásti.

**Základnami mohou být:**

- skutečné roviny, které se při měření nahrazují obalovými rovinami,
- přímky (osy souměrnosti),
- body (středů).

Nesouosost válcových ploch se může týkat hřídelů i děr s odstupňovanými průměry. Při měření vnějších válcových ploch se výrobek vycentruje, např. na otočném stole, podle válcové plochy, která je považována za vztažnou (označená písmenem). Excentricitu ostatních válcových ploch pak měříme na několika dalších válcových plochách a hledáme maximální úchylku. Nesouosost, resp. excentricita oproti referenční ose, se určí z maximální a minimální úchylky. Na obr. 3.5 je zobrazena značka tolerance soustřednosti a souososti (zleva), vysvětlení tolerance a příklad předpisu na výkrese. [4][1]



Obr. 3.5 Tolerance soustřednosti a souososti [18]



## 4. Zhotovení experimentálních vzorků

Aby bylo možno porovnat geometrickou přesnost při soustružení pomocí rotační C osy a lineární osy Y, je nutné vytvořit skupinu vzorků na jednotlivých soustružnických centrech a ty následně analyzovat.

### 4.1 Experimentální vzorek

Celkem bylo zhotoveno 18 zkušebních vzorků. Na kterých byla následně provedena pomocí CMM analýza geometrických odchylek tvaru, směru a polohy. Výkres vzorku je v příloze A. Nejedná se o výrobní výkres. Jsou zde jen schematicky vyznačeny měřené geometrické tolerance, které je třeba změřit a analyzovat. Na každém vzorku byly vysoustruženy dva čtverce, a to různými metodami, tyto plochy se následně analyzovaly.

#### Počet zkušebních vzorků na jednotlivých soustružnických centrech:

- CNC DMG MORI NLX 2500MC/700 před kalibrací soustružnického centra
  - **3 kusy**      větší čtverec axiální frézování C osou  
                  menší čtverec radiální frézování Z osou
- CNC DMG MORI NLX 2500MC/700 po kalibraci soustružnického centra
  - **5 kusů**      větší čtverec axiální frézování C osou  
                  menší čtverec radiální frézování Z osou
- CNC DMG MORI NLX 2500Y/700
  - **5 kusů**      větší čtverec axiální frézování C osou  
                  menší čtverec axiální frézování Y osou
  - **5 kusů**      větší čtverec axiální frézování C osou  
                  menší čtverec radiální frézování Y osou

#### 4.1.1 Polotovar

Tyč válcovaná za tepla Ø 28mm délka L=130mm. Materiál 1.1191 (C 45, 12050).



Obr. 4.1 Vyhrubovaný polotovar ve sklíčidle

##### Vlastnosti oceli 1.1191

Nejpoužívanější ušlechtilá uhlíková ocel 1.1191 (C 45, 12050) vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení je dodávána v žíhaném stavu s vysokou houževnatostí. Materiál 1.1191 (C 45, 12050) je velmi dobře obrobitelný, s dobrou tvarovou stabilitou po tepelném zpracování. Je nutno počítat s malou prokalitelností. Pevnost se pohybuje v rozmezí 590 - 710 MPa. Tvrdost ve stavu žíhaném naměkko je max. 200 HB. Dosažitelná tvrdost po kalení činí 62 HRC. [6]

##### Složení materiálu 1.1191:

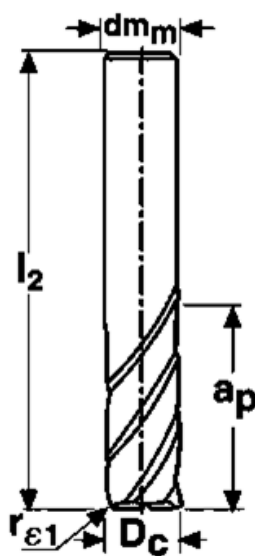
|                                 | <b>C</b>     | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>Cu</b> | <b>P</b>    | <b>S</b>    |
|---------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| <b>1.1191<br/>(dle<br/>ČSN)</b> | 0,42-<br>0,5 | 0,5-0,8   | 0,17-0,4  | max 0,4   | max 0,4   | max 0,30  | max<br>0,04 | max<br>0,04 |

### 4.1.2 Frézovací nástroj

Pro frézování rovinných ploch na obou soustružnických centerch, jak axiálně, tak radiálně, byla použita fréza 554120R050Z4.3 – SIRON-A. Na obr. 5.2 jsou znázorněny parametry frézy. [7]

Parametry frézy:

| [mm]                   | $D_c$ | $dm_m$ | $l_2$ | $a_p$ | $r_{\epsilon 1}$ | $z_n$ |
|------------------------|-------|--------|-------|-------|------------------|-------|
| 554120R050Z4.3-SIRON-A | 12    | 12     | 80    | 26    | 0,5              | 4     |



Obr. 4.2 Parametry frézy [7]

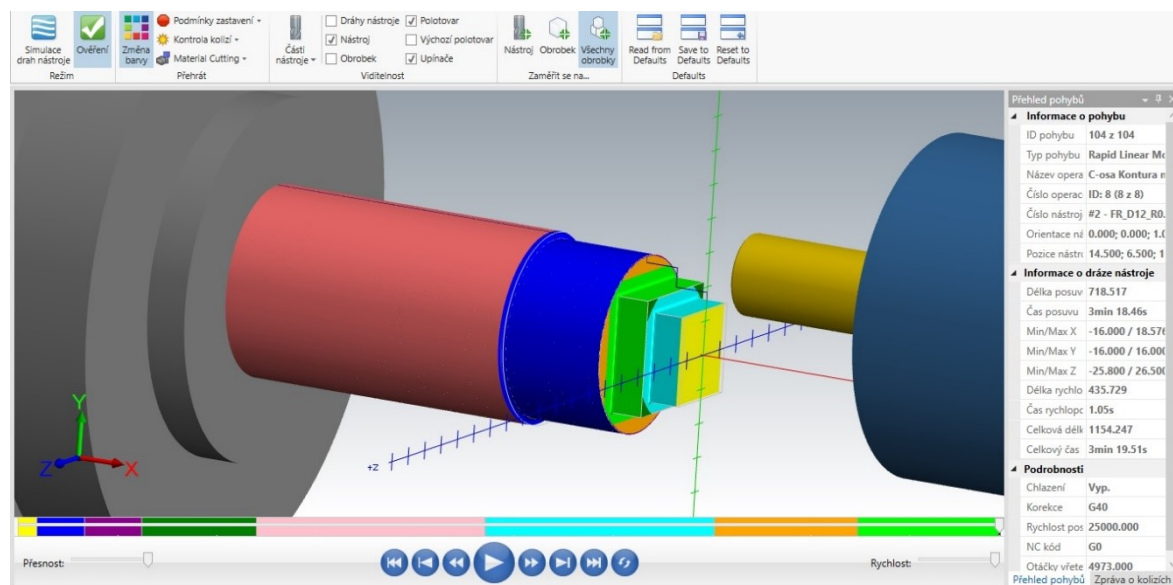
## 4.2 Soustružení analyzovaného vzorku

Nejprve bylo provedeno soustružení na soustružnicko-frézovacím CNC obráběcím centrem DMG MORI NLX 2500MC/700, které se nachází na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB-TUO v budově CPIT. Byly zde obrobena 3 analyzované vzorky pomocí rotační C osy a lineární Z osy. Po následné kalibraci soustružnického centra zde bylo obrobena dalších 5 kusů. Díky tomu bylo možno porovnat přesnost soustružnického centra před a po kalibraci.

Další obrábění proběhlo na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700 ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o, která sídlí v Mokřých Lazcích. Zde bylo obrobena celkem 10 zkušebních vzorku pomocí lineární Y osy. Z toho konkrétně 5 vzorků axiálním soustružením a 5 vzorků radiálním soustružením.

### 4.2.1 Programování v CAM systému

Soustružnický program byl vytvořen v CAM systému – Mastercam X8. Analyzovaná součást byla vymodelována v CAD systému Autodesk Inventor 2017 (studentská verze). Ukázka simulace programu Mastercam X8 obr. 4.3. [2][3]



Obr 4.3 Ukázka simulace soustružení v programu Mastercam X8

#### 4.2.2 Postup soustružení

Seřizovací list (příloha B) i strojní časy jednotlivých operací jsou vygenerovány z CAM systému Mastercam X8. Pro představu byl reálný čas soustružení zhruba o 20 % delší než z programu Mastercam. Seřizovací list je vytvořen pro soustružnického centra, které se nachází na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie (DMG MORI NLX 2500MC/700). Soustružení na druhém stroji s přidanou Y osou (DMG MORI NLX 2500Y/700) bylo provedeno ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o. Programování prováděl samotný operátor přímo u stroje.

##### **Technologický postup:**

V příloze L a M jsou přiloženy tři technologické postupy, které byly použity při výrobě analyzovaných součástí. První technologický postup je vytvořen pro stroj DMG MORI NLX 2500Y/700. Počet vyrobených kusů je 5. Na této součásti bylo stěžujícím prvkem vytvořit rovinnou plochu pomocí axiálního frézování Y osou. Další použitou technologií bylo axiální frézování pomocí C osy.

Druhý technologický postup je také pro stroj DMG MORI NLX 2500Y/700. Zde bylo však stěžujícím prvkem vytvořit rovinnou plochu pomocí radiálního frézování Y osou. Další použitou technologií bylo axiální frézování pomocí C osy.

Třetí technologický postup je použit pro stroj DMG MORI NLX 2500MC/700. Zde bylo nejdůležitější vytvořit rovinnou plochu pomocí axiálního frézování C osou a také radiální frézování pomocí Z osy.

Zvolená fréza měla Ø12 mm, proto byla zvolena výška jednotlivých čtverců na analyzovaných součástech 5 mm. Důvodem byla nutnost předejít zkreslení výsledků tím, že pojedeme po ploše středem frézky.



## 5. Analýza přesnosti zkušebních vzorků

Analýza přesnosti byla provedena na CMM Zeiss Prismo 7 (obr 5.1). Veškeré naměřené hodnoty jsou v přílohách D, E, F a G. Popis jednotlivých stran analyzovaného vzorku je v příloze C.

Na každém vzorku byly kontrolovány tyto geometrické odchylky.

### Kontroly geometrické přesnosti:

- Kolmost (4x kolmost ploch spodního čtverce, 4x kolmost ploch horního čtverce)
- Rovnoběžnost (2x rovnoběžnost ploch spodního čtverce, 2x rovnoběžnost ploch horního čtverce)
- Rovinnost (4x rovinnost ploch spodního čtverce, 4x rovinnost ploch horního čtverce)
- Souosost (1x souosost spodního čtverce s osou válcové podstavy, 1x souosost Horního čtverce s osou válcové podstavy)



*Obr 5.1 Měření na CMM Zeiss Prismo 7*

## 5.1 Výpočet nejistoty měření

Pro výpočet nejistoty měření byla použita standardní nejistota typu A, B, C a rozšířená standardní nejistota typu C. Dále pak byla spočtena hrubá chyba. Z důvodu velkého množství dat budu uvádět jen jeden příklad výpočtu, a to na kolmost 1-4 strany horního čtverce (soustruženo Y osou axiálně). Popis stran součásti je v příloze C. Veškeré naměřené hodnoty pro axiální frézování pomocí Y osy jsou v příloze D.

Veškeré další výpočty se již opakovaly analogicky, a byly spočteny v programu Excel.

### 5.1.1 Aritmetický průměr

Pro přehlednější analýzu dat byly hodnoty aritmeticky zprůměrovány. A to vždy 5 stejných hodnot na pěti analyzovaných vzorcích. V tomto případě to bylo 5 naměřených hodnot kolmosti 1-4 strany (Y osa axiálně) na pěti vzorcích. Viz příloha H. [4]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i$$

$$\bar{x} = 0,0017mm$$

*n ... počet měření*

*x<sub>i</sub> ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny X*

### 5.1.2 Směrodatná odchylka

Pro výpočet standardní nejistoty bylo potřeba vypočítat směrodatnou odchylku. Příklad výpočtu je proveden pro kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků. Viz příloha H. [4]

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - 0,0017)^2}{5 - 1}}$$

$$s(x) = 0,000587mm$$

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr

$n$  ... počet měření

$x_i$  ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny  $X$

### 5.1.3 Hrubá chyba $H_n$

Příklad výpočtu hrubé chyby je proveden na prvním z pěti vzorků a to kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně). Viz příloha H.

Po vypočtení hrubé chyby bylo zjištěno, že z 396 naměřených hodnot jich 8 překročilo mezní hodnotu  $H$  ( $\pm 1,67$ ). S těmito hodnotami se již dále nepracovalo. Na celkový aritmetický průměr to mělo žádný či minimální dopad. [4]

### Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost 95%

|                 |      |      |      |      |       |      |       |       |
|-----------------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| Rozsah výběru n | 5    | 10   | 15   | 20   | 30    | 40   | 50    | 100   |
| Mezní hodnota H | 1,67 | 2,18 | 2,41 | 2,56 | 3,402 | 3,48 | 3,541 | 3,723 |

$$H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)}$$

$$H_n = \frac{0,0021 - 0,0017}{0,000587}$$

$$H_n = 0,6954$$

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr

$x_n$  ... n – tý kus měření

$s(x)$  ... směrodatná odchylka

#### 5.1.4 Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A se získává z opakovaných měření a jejich hodnota s počtem měření klesá. Při nezávislých naměřených hodnotách se standardní nejistota váže na výběrový průměr a zjistí se výpočtem směrodatné odchylky  $s(\bar{x})$ :

Příklad výpočtu je pro kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků. Viz příloha H. [4]

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - 0,0017)^2}{5(5-1)}}$$

$$u_A = s(\bar{x}) = 0,000262mm$$

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr

$n$  ... počet měření

$x_i$  ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny X

### 5.1.5 Standardní nejistota typu B1

Tato nejistota měření je způsobena především nepřesností dotykové sondy. Tato chyba byla po zkušenostech zvolena 3 %. Příklad výpočtu je pro kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků. Viz příloha H. [4]

$$u_{B1} = \frac{(\bar{x} \cdot \delta)}{\sqrt{3}}$$

$$u_{B1} = \frac{(0,0017 \cdot 0,03)}{\sqrt{3}}$$

$$u_{B1} = 0,000030mm$$

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr

$\delta$  ... relativní chyba způsobená nepřesností dotykové sondy

### 5.1.6 Standardní nejistota typu B2

Relativní chyba měřicího stroje byla po konzultaci zvolena 3 %. Příklad výpočtu je pro kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků. Viz příloha H. [4]

$$u_{B2} = (\bar{x} \cdot \delta_2)$$

$$u_{B2} = (0,0017 \cdot 0,03)$$

$$u_{B2} = 0,0000519mm$$

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr

$\delta_2$  ... relativní chyba měřicího stroje

### 5.1.7 Standardní nejistota typu B

Tato hodnota není závislá na počtu měření. Metodika určování této nejistoty je metodika určování standardní nejistoty vázané na výběrový průměr určená jiným způsobem, nikoliv výpočtem směrodatné odchylky z opakovaných měření. V tomto případě vycházíme z údajů nejistot měření stanoveného měřidla.

Příklad výpočtu je proveden pro kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků. Viz příloha H. [4]

$$u_B = \sqrt{(u_{B1}^2 + u_{B2}^2)}$$
$$u_B = \sqrt{(0,000030^2 + 0,0000519^2)}$$
$$u_B = 0,0000599mm$$

$u_{B1}$  ... standardní nejistota typu B1

$u_{B2}$  ... standardní nejistota typu B2

### 5.1.8 Standardní nejistota typu C

Pokud již známe standardní nejistotu typu A a B, můžeme vypočítat kombinovanou standardní nejistotu  $U_c$ .

Příklad výpočtu je pro kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků. Viz příloha H. [4]

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$$
$$u_C = \sqrt{(0,000262^2 + 0,0000599^2)}$$
$$u_C = 0,000269mm$$

$u_A$  ... standardní nejistota typu A

$u_B$  ... standardní nejistota typu B

### 5.1.9 Rozšířená standardní nejistota typu C

Koeficient rozšíření byl zvolen  $k=2$ , tedy pro pravděpodobnost 95,45%. Příklad výpočtu je pro kolmost 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků. Viz příloha H. [4]

$$k_u = 2 \dots \text{pro pravděpodobnost } 95,45\%$$

$$U = k_u \cdot u_c$$

$$U = 2 \cdot 0,000269$$

$$U = 0,000539mm$$

$k_u$  ... koeficient rozšíření

$u_c$  ... standardní nejistota typu C

Průměrná hodnota kolmosti 1-4 strany (Y osa axiálně) všech pěti vzorků se pak zapíše takto: (Viz kapitola 6.1.1.)

$$K1_{5Yax} = (0,0017 \pm 0,0005)mm$$

## 6. Výsledky měření

Vypočtené nejistoty měření pro všechny vzorky se nachází v přílohách H, I, J a K. Jsou zde vypočteny průměry pro jednotlivá měření, směrodatná odchylka, standardní nejistota typu A, B1, B2, B, C a rozšířená standardní nejistota typu C pro pravděpodobnost 95,45%. Hodnoty v tabulkách jsou zapsány v mm. Popis stran analyzovaného vzorku se nachází v příloze C.

Do této kapitoly přikládám jen aritmetické průměry jednotlivých měření s rozšířenou standardní nejistotou typu C. Nejprve pro jednotlivé stejné strany analyzovaného vzorku zvlášť. Následně pak aritmetický průměr ze všech naměřených hodnot s rozšířenou standardní nejistotou typu C. Podrobný popis označení jednotlivých výsledků se nachází v seznamu použitých značek a symbolů.

### 6.1 Geometrické odchylky kolmosti

Zde jsou výsledky z měření kolmosti pomocí Y-osy a to axiálně a radiálně, dále odchylky kolmosti pomocí C-osy a Z-osy před a po kalibraci stroje. V příloze A je přiložen schématický výkres s jednotlivými měřenými tolerancemi.

#### 6.1.1 Kolmost Y-osa axiální soustružení

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4

$$K1_{5Yax} = (0,0017 \pm 0,0005)mm$$

$$K2_{5Yax} = (0,0054 \pm 0,0018)mm$$

$$K3_{5Yax} = (0,0077 \pm 0,0030)mm$$

$$K4_{5Yax} = (0,0030 \pm 0,0013)mm$$

$$\mathbf{K_{20Yax} = (0,0045 \pm 0,0014)mm}$$



### 6.1.2 Kolmost Y-osa radiální soustružení

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4

$$K1_{5Yrad} = (0,0015 \pm 0,0002)mm$$

$$K2_{5Yrad} = (0,0026 \pm 0,0007)mm$$

$$K3_{5Yrad} = (0,0032 \pm 0,0010)mm$$

$$K4_{5Yrad} = (0,0017 \pm 0,0002)mm$$

$$K_{20Yrad} = (0,0022 \pm 0,0004)mm$$

### 6.1.3 Kolmost před seřízením soustružnického centra (C + Z osa)

Počet vzorků: 3

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4 + 4

$$K1_{3Cpred} = (0,0037 \pm 0,0003)mm$$

$$K1_{3Zpred} = (0,0049 \pm 0,0008)mm$$

$$K2_{3Cpred} = (0,0053 \pm 0,0011)mm$$

$$K2_{3Zpred} = (0,0056 \pm 0,0006)mm$$

$$K3_{3Cpred} = (0,0034 \pm 0,0007)mm$$

$$K3_{3Zpred} = (0,0039 \pm 0,0004)mm$$

$$K4_{3Cpred} = (0,0062 \pm 0,0007)mm$$

$$K4_{3Zpred} = (0,0048 \pm 0,0008)mm$$

$$K_{12Cpred} = (0,0046 \pm 0,0009)mm$$

$$K_{12Zpred} = (0,0046 \pm 0,0006)mm$$

### 6.1.4 Kolmost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa)

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4 + 4

$$K1_{5Cpo} = (0,0053 \pm 0,0010)mm$$

$$K1_{5Zpo} = (0,0016 \pm 0,0005)mm$$

$$K2_{5Cpo} = (0,0039 \pm 0,0010)mm$$

$$K2_{5Zpo} = (0,0024 \pm 0,0004)mm$$

$$K3_{5Cpo} = (0,0022 \pm 0,0005)mm$$

$$K3_{5Zpo} = (0,0023 \pm 0,0004)mm$$

$$K4_{5Cpo} = (0,0055 \pm 0,0015)mm$$

$$K4_{5Zpo} = (0,0019 \pm 0,0009)mm$$

$$K_{20Cpo} = (0,0042 \pm 0,0008)mm$$

$$K_{20Zpo} = (0,0021 \pm 0,0003)mm$$

## 6.2 Geometrické odchylky rovnoběžnosti

Zde jsou výsledky z měření rovnoběžnosti pomocí Y-osy a to axiálně a radiálně, dále odchylky rovnoběžnosti pomocí C-osy a Z-osy před a po kalibraci soustružnického centra. V příloze A je přiložen schématický výkres s jednotlivými měřenými tolerancemi.

### 6.2.1 Rovnoběžnost Y-osa axiální soustružení

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 2

$$R1_{5Yax} = (0,0080 \pm 0,0014)mm$$

$$R2_{5Yax} = (0,0115 \pm 0,0018)mm$$

$$\mathbf{R_{10Yax} = (0,0097 \pm 0,0017)mm}$$

### 6.2.2 Rovnoběžnost Y-osa radiální soustružení

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 2

$$R1_{5Yrad} = (0,0018 \pm 0,0004)mm$$

$$R2_{5Yrad} = (0,0035 \pm 0,0009)mm$$

$$\mathbf{R_{10Yrad} = (0,0027 \pm 0,0008)mm}$$

### 6.2.3 Rovnoběžnost před seřízením soustružnického centra (C + Z osa)

Počet vzorků: 3

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 2 + 2

$$R1_{3Cpred} = (0,0084 \pm 0,0009)mm$$

$$R1_{3Zpred} = (0,0140 \pm 0,0016)mm$$

$$R2_{3Cpred} = (0,0050 \pm 0,0010)mm$$

$$R2_{3Zpred} = (0,0059 \pm 0,0006)mm$$

$$\mathbf{R_{6Cpred} = (0,0067 \pm 0,0017)mm}$$

$$\mathbf{R_{6Zpred} = (0,0099 \pm 0,0038)mm}$$

## 6.2.4 Rovnoběžnost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa)

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 2 + 2

$$R1_{5Cpo} = (0,0077 \pm 0,0010)mm$$

$$R1_{5Zpo} = (0,0029 \pm 0,0006)mm$$

$$R2_{5Cpo} = (0,0094 \pm 0,0015)mm$$

$$R2_{5Zpo} = (0,0028 \pm 0,0005)mm$$

$$R10_{Cpo} = (0,0085 \pm 0,0011)mm$$

$$R10_{Zpo} = (0,0029 \pm 0,0004)mm$$

## 6.3 Geometrické odchylky rovinnosti

Zde jsou výsledky z měření rovinnosti pomocí Y-osy a to axiálně a radiálně, dále odchylky rovinnosti pomocí C-osy a Z-osy před a po kalibraci soustružnického centra. V příloze A je přiložen schématický výkres s jednotlivými měřenými tolerancemi.

### 6.3.1 Rovinnost Y-osa axiální soustružení

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4

$$RI1_{5Yax} = (0,0014 \pm 0,0003)mm$$

$$RI2_{5Yax} = (0,0018 \pm 0,0002)mm$$

$$RI3_{5Yax} = (0,0016 \pm 0,0005)mm$$

$$RI4_{5Yax} = (0,0015 \pm 0,0002)mm$$

$$RI_{20Yax} = (0,0016 \pm 0,0002)mm$$

### 6.3.2 Rovinnost Y-osa radiální soustružení

Zde byla jedna hodnota rovinnosti zatížena hrubou chybou, proto se s ní již dále nepočítalo a je výsledný počet měření roven 19.

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4

$$RI1_{5Yrad} = (0,0012 \pm 0,0001)mm$$

$$RI2_{5Yrad} = (0,0018 \pm 0,0003)mm$$

$$RI3_{4Yrad} = (0,0016 \pm 0,0001)mm$$

$$RI4_{5Yrad} = (0,0015 \pm 0,0002)mm$$

$$RI_{19Yrad} = (0,0015 \pm 0,0002)mm$$

### 6.3.3 Rovinnost před seřazením soustružnického centra (C + Z osa)

Počet vzorků: 3

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4 + 4

$$RI1_{3Cpred} = (0,0021 \pm 0,0003)mm$$

$$RI1_{3Zpred} = (0,0020 \pm 0,0002)mm$$

$$RI2_{3Cpred} = (0,0018 \pm 0,0011)mm$$

$$RI2_{3Zpred} = (0,0020 \pm 0,0003)mm$$

$$RI3_{3Cpred} = (0,0013 \pm 0,0007)mm$$

$$RI3_{3Zpred} = (0,0017 \pm 0,0002)mm$$

$$RI4_{3Cpred} = (0,0026 \pm 0,0007)mm$$

$$RI4_{3Zpred} = (0,0017 \pm 0,0002)mm$$

$$RI_{12Cpred} = (0,0020 \pm 0,0004)mm$$

$$RI_{12Zpred} = (0,0019 \pm 0,0002)mm$$

### 6.3.4 Rovinnost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa)

Zde byly tři hodnoty rovinnosti zatíženy hrubou chybou, a to dvě při soustružení pomocí rotační C osy a jedna pomocí soustružení lineární Z osou. S těmito hodnotami se již dále nepracovalo.

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 4 + 4

$$RI1_{5Cpo} = (0,0021 \pm 0,0003)mm$$

$$RI1_{5Zpo} = (0,0009 \pm 0,0001)mm$$

$$RI2_{5Cpo} = (0,0017 \pm 0,0002)mm$$

$$RI2_{4Zpo} = (0,0014 \pm 0,0002)mm$$

$$RI3_{5Cpo} = (0,0017 \pm 0,0002)mm$$

$$RI3_{5Zpo} = (0,0013 \pm 0,0002)mm$$

$$RI4_{4Cpo} = (0,0014 \pm 0,0001)mm$$

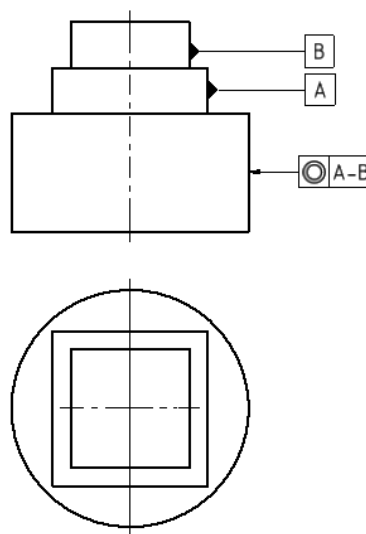
$$RI4_{4Zpo} = (0,0016 \pm 0,0001)mm$$

$$RI_{19Cpo} = (0,0017 \pm 0,0002)mm$$

$$RI_{18Zpo} = (0,0013 \pm 0,0002)mm$$

## 6.4 Geometrické odchylky souososti

Zde jsou výsledky z měření souososti pomocí Y-osity a to axiálně a radiálně, dále odchylky souososti pomocí C-osity a Z-osity před a po kalibraci soustružnického centra. V příloze A je přiložen schématický výkres s jednotlivými měřeními tolerancemi. Zde příkládám (obr 6.1) ještě schématické znázornění měření souososti. Ta byla porovnávána s osou válcové podstavy. Každý ze čtverců byl porovnáván zvlášť. Výsledná hodnota je odchylka souososti čtverce od osy válcové podstavy, nevíme však do kterého kvadrantu se který čtverec posunul. Proto bych při příštím měření této odchylky souososti zvolil jinou strategii měření.



Obr. 6.1 Schématické znázornění měření souososti na analyzovaném vzorku

### 6.4.1 Souosost Y-osa axiální soustružení

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 1

$$S_{5Yax} = (0,0460 \pm 0,0067)mm$$

### 6.4.2 Souosost Y-osa radiální soustružení

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 1

$$S_{5Yrad} = (0,0364 \pm 0,0067)mm$$

#### **6.4.3 Souosost před seřizením soustružnického centra (C + Z osa)**

Počet vzorků: 3

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 1+1

$$S_{3Cpred} = (0,0493 \pm 0,0050)mm$$

$$S_{3Zpred} = (0,0396 \pm 0,0123)mm$$

#### **6.4.4 Souosost po seřízení soustružnického centra (C + Z osa)**

Počet vzorků: 5

Počet měřených odchylek na jednom vzorku: 1+1

$$S_{5Cpo} = (0,0326 \pm 0,0070)mm$$

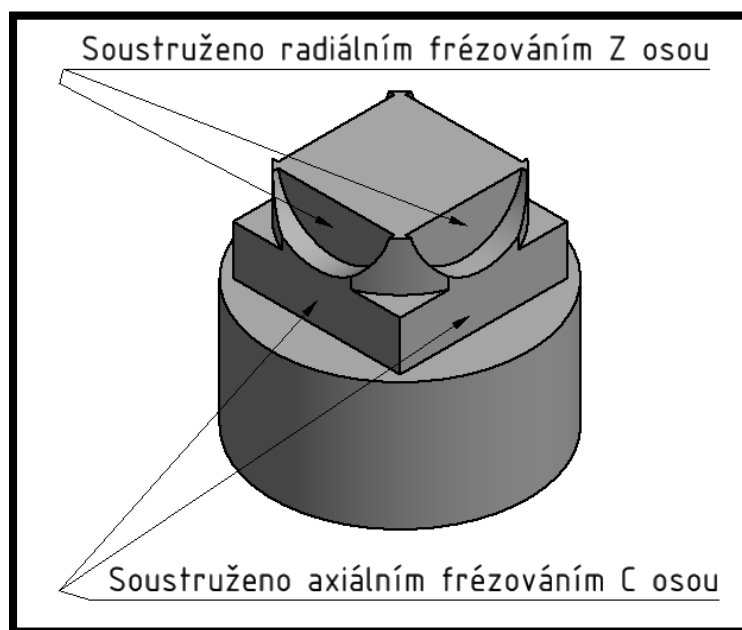
$$S_{5Zpo} = (0,0320 \pm 0,0043)mm$$

## 7. Grafické porovnání přesnosti

Pro přehlednější porovnání jednotlivých geometrických odchylek, jsou vypočtená data graficky porovnána do sloupcových grafů.

### 7.1 Porovnání přesnosti obrobených ploch před a po seřízení soustružnického centra DMG MORI NLX 2500MC/700

Zde je uvedeno porovnání geometrických odchylek kolmosti, rovnoběžnosti, rovinnosti a souososti na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700, které se nachází na katedře 346 a to před a po revizi tohoto soustružnického centra. Na obr. 7.1 jsou znázorněny metody soustružení. Tímto způsobem byly na stroji vyrobeny nejprve 3 vzorky před revizí soustružnického centra a následně 5 vzorků po revizi. V příloze A je přiložen schématický výkres s jednotlivými měřenými tolerancemi.



*Obr. 7.1 Metody soustružení jednotlivých čtverců na analyzované součásti*

#### Revize stroje

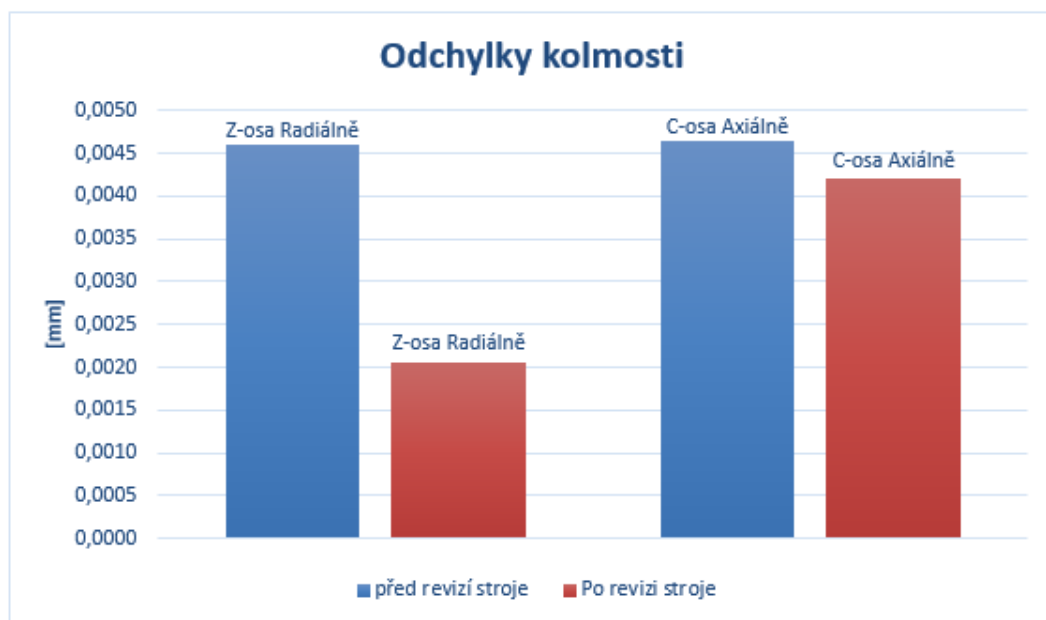
Na soustružnickém centru, které se nachází na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie byla provedeny tyto zásahy:

- Opravení přesnosti Axiálního rotačního upínače,
- seřízení nástrojové sondy.



### 7.1.1 Porovnání odchylky kolmosti

Z grafu (obr. 7.2) je patrné že se geometrická odchylka kolmosti pomocí radiálního soustružení Z-osou zmenšila z 4,6 na 2,1  $\mu\text{m}$  tedy o **2,5  $\mu\text{m}$** . Dále je zde vidět mírné zlepšení i v geometrické odchylce kolmosti pomocí axiálního soustružení rotační C-osou a to o **0,4  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



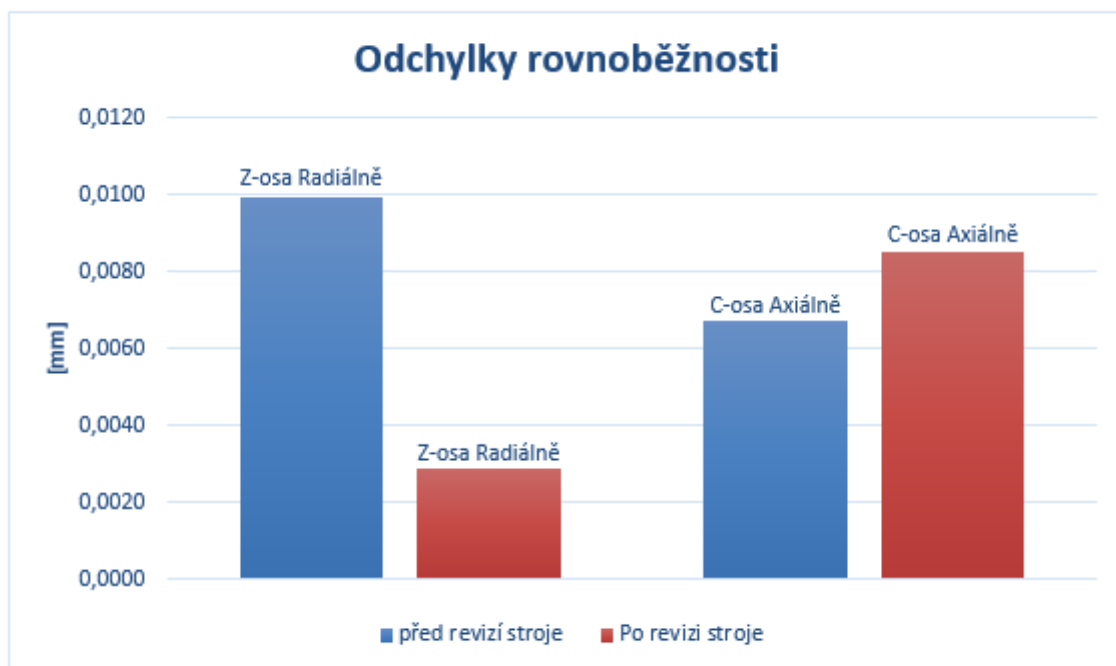
Obr. 7.2 Porovnání velikosti odchylky kolmosti před a po revizi soustružnického centra na katedře 346

#### Procentuální zlepšení odchylky kolmosti po revizi stroje:

- Radiální frézování pomocí Z osy – zlepšení o **2,5  $\mu\text{m}$  tedy o 54,3 %**
- Axiální frézování pomocí C osy – zlepšení o **0,4  $\mu\text{m}$  tedy o 8,7 %**

### 7.1.2 Porovnání odchytky rovnoběžnosti

Z grafu (obr. 7.3) je patrné, že se geometrická odchytka kolmosti pomocí radiálního soustružení Z-osou zmenšila z 9,9 na 2,9  $\mu\text{m}$  tedy o **7,0  $\mu\text{m}$** . Dále je zde vidět mírné zhoršení v geometrické odchylce rovnoběžnosti pomocí axiálního soustružení rotační C-osou a to o **1,8  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



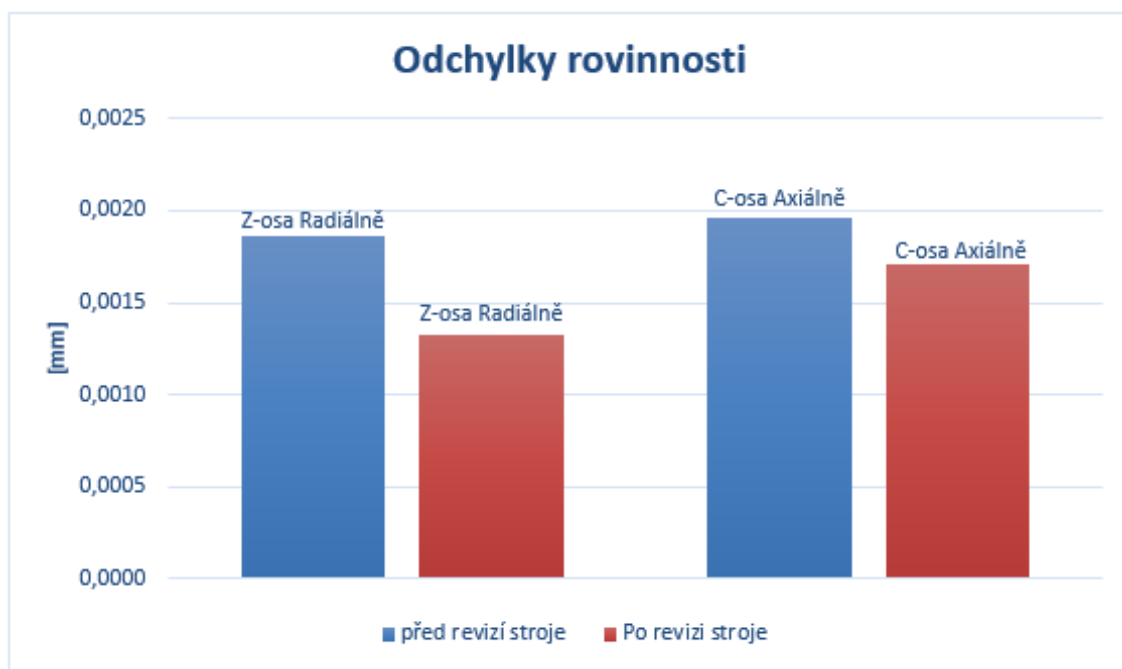
Obr. 7.3 Porovnání velikosti odchytky rovnoběžnosti před a po revizi soustružnického centra na katedře 346

#### Procentuální zlepšení odchytky rovnoběžnosti po revizi stroje:

- Radiální frézování pomocí Z osy – zlepšení o **7,0  $\mu\text{m}$  tedy o 70,7 %**
- Axiální frézování pomocí C osy – zhoršení o **1,8  $\mu\text{m}$  tedy o 21,2 %**

### 7.1.3 Porovnání odchylky rovinnosti

Z grafu (obr. 7.4) je patrné, že se geometrická odchylka rovinnosti pomocí radiálního soustružení Z-osou zmenšila z 1,9 na 1,3  $\mu\text{m}$  tedy o **0,6  $\mu\text{m}$** . Dále je zde vidět mírné zlepšení i v geometrické odchylce rovinnosti pomocí axiálního soustružení rotační C-osou a to o **0,3  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



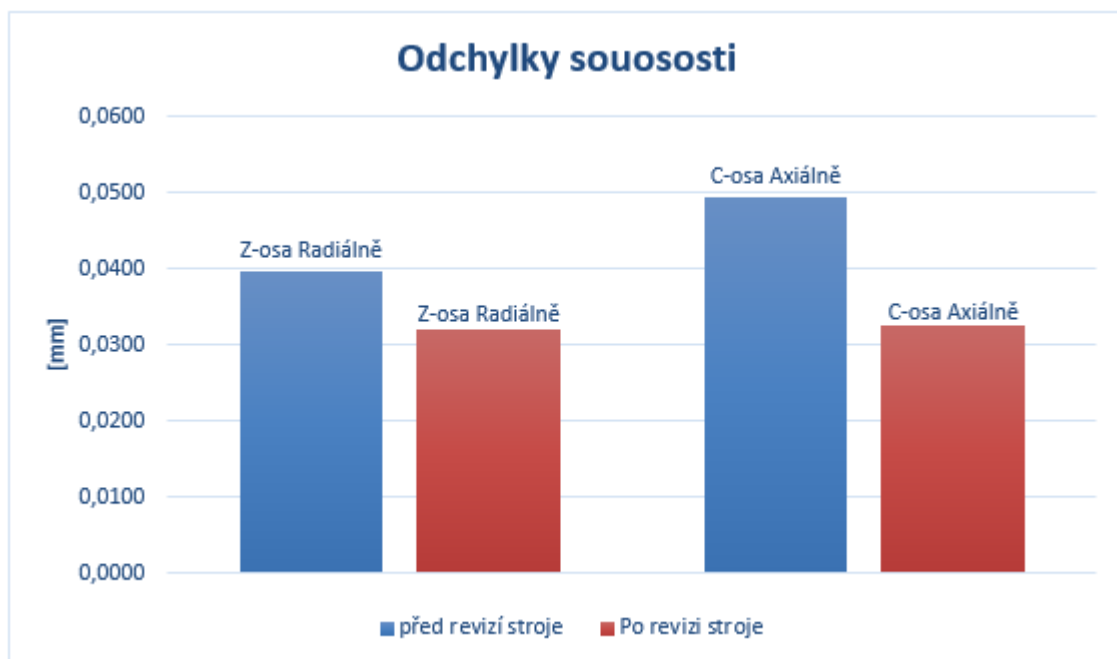
Obr. 7.4 Porovnání velikosti odchylky rovinnosti před a po revizi soustružnického centra na katedře 346

#### Procentuální zlepšení odchylky rovinnosti po revizi stroje:

- Radiální frézování pomocí Z osy – zlepšení o **0,6  $\mu\text{m}$  tedy o 31,6 %**
- Axiální frézování pomocí C osy – zlepšení o **0,3  $\mu\text{m}$  tedy o 15 %**

#### 7.1.4 Porovnání odchylnosti souososti

Z grafu (obr. 7.5) je patrné, že se geometrická odchylnost souososti pomocí radiálního soustružení Z-osou zmenšila z 39,6 na 32,0  $\mu\text{m}$  tedy o **7,6  $\mu\text{m}$** . Dále je zde vidět i výrazné zlepšení v geometrické odchylce rovinnosti pomocí axiálního soustružení rotační C-osou a to o **16,7  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



Obr. 7.5 Porovnání velikosti odchylnosti souososti před a po revizi soustružnického centra na katedře 346

#### Procentuální zlepšení odchylnosti souososti po revizi stroje:

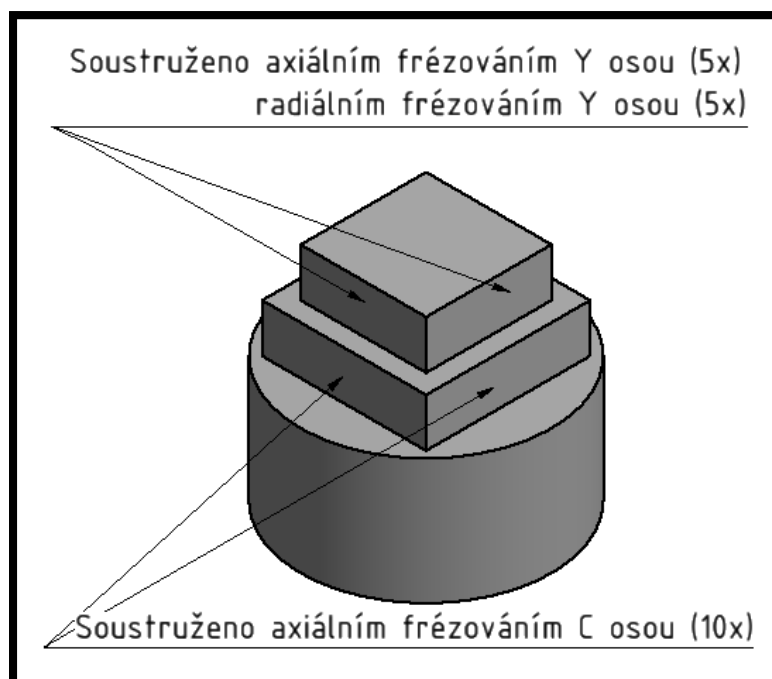
- Radiální frézování pomocí Z osy – zlepšení o **7,6  $\mu\text{m}$  tedy o 19,2 %**
- Axiální frézování pomocí C osy – zlepšení o **16,7  $\mu\text{m}$  tedy o 33,9 %**

## 7.2 Porovnání přesnosti obrobených ploch při soustružení s C a Y osou

Zde byly porovnávány tři metody soustružení, a to axiální soustružení pomocí lineární Y osy, radiální soustružení pomocí lineární Y osy a axiální soustružení pomocí rotační C osy, a to na dvou soustružnických centrech. Soustružení pomocí lineární Y osy, jak radiální tak axiální, probíhalo na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700 ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o. Soustružení pomocí rotační C osy probíhalo na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500MC/700, které se nachází na katedře 346. Hodnoty z tohoto soustružnického centra jsou uvedeny po revizi stroje.

Na obr. 7.6 jsou znázorněny metody soustružení na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500Y/700 ve firmě Haberkorn Ulmer s.r.o. Tímto způsobem bylo na stroji vyrobeno nejprve 5 vzorků pomocí axiálního frézování Y osou a následně dalších 5 vzorků pomocí radiálního frézování Y osou. Jak je patrné z obr. 7.6, tak zde bylo prováděno i axiální frézování pomocí C osy. S těmito hodnotami se zde dále nepracuje a jsou použity hodnoty naměřené ze stroje DMG MORI NLX 2500MC/700, který se nachází na katedře 346. Hodnoty jsou uváděny po revizi tohoto stroje.

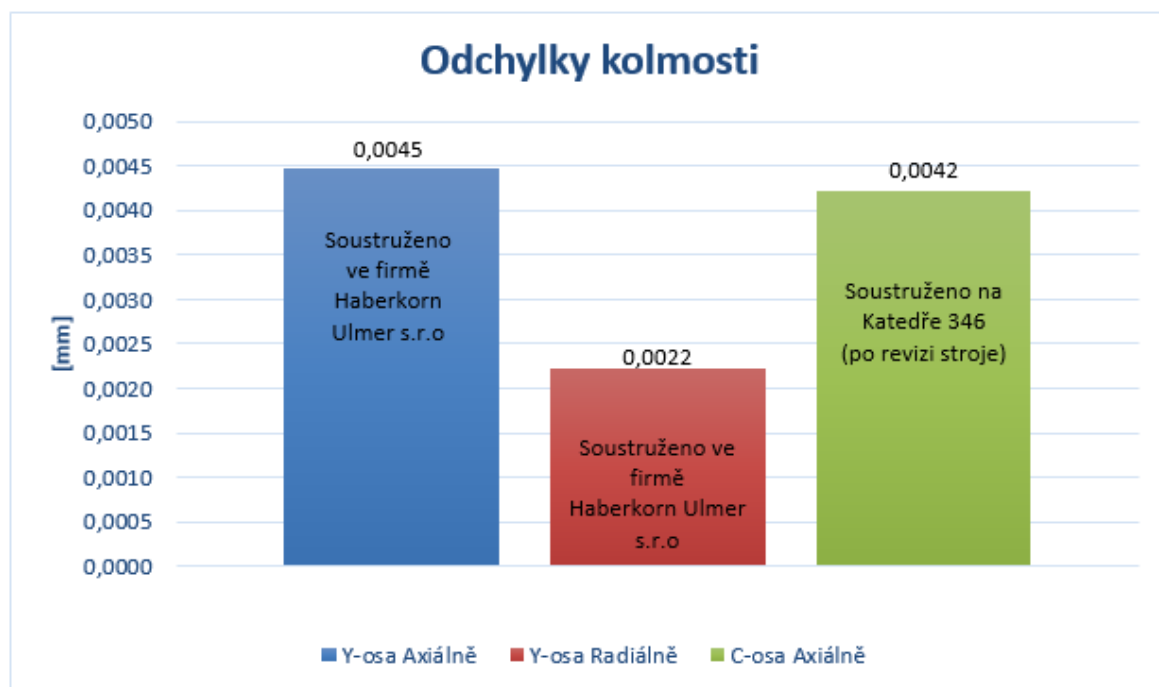
V příloze A je přiložen schématický výkres s jednotlivými měřenými tolerancemi.



Obr. 7.6 Metody soustružení jednotlivých čtverců na analyzované součásti

### 7.2.1 Porovnání odchylky kolmosti

Z grafu (obr. 7.7) je patrné, že nejlepších výsledků při obrábění kolmých ploch dosahujeme při radiálním frézování pomocí lineární Y osy. Touto metodou byla naměřena odchylka kolmosti pouze **2,2  $\mu\text{m}$** . Druhý nejlepší výsledek byl naměřen na rotační C ose **4,2  $\mu\text{m}$** . Nejhuře při obrábění kolmých ploch skončila metoda axiálního soustružení Y osou. Zde byla naměřena průměrná hodnota odchylky kolmosti **4,5  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



Obr. 7.7 Porovnání velikosti odchylky kolmosti pomocí soustružení s Y a C osou

#### Procentuální porovnání přesnosti soustružení pomocí C a Y osy:

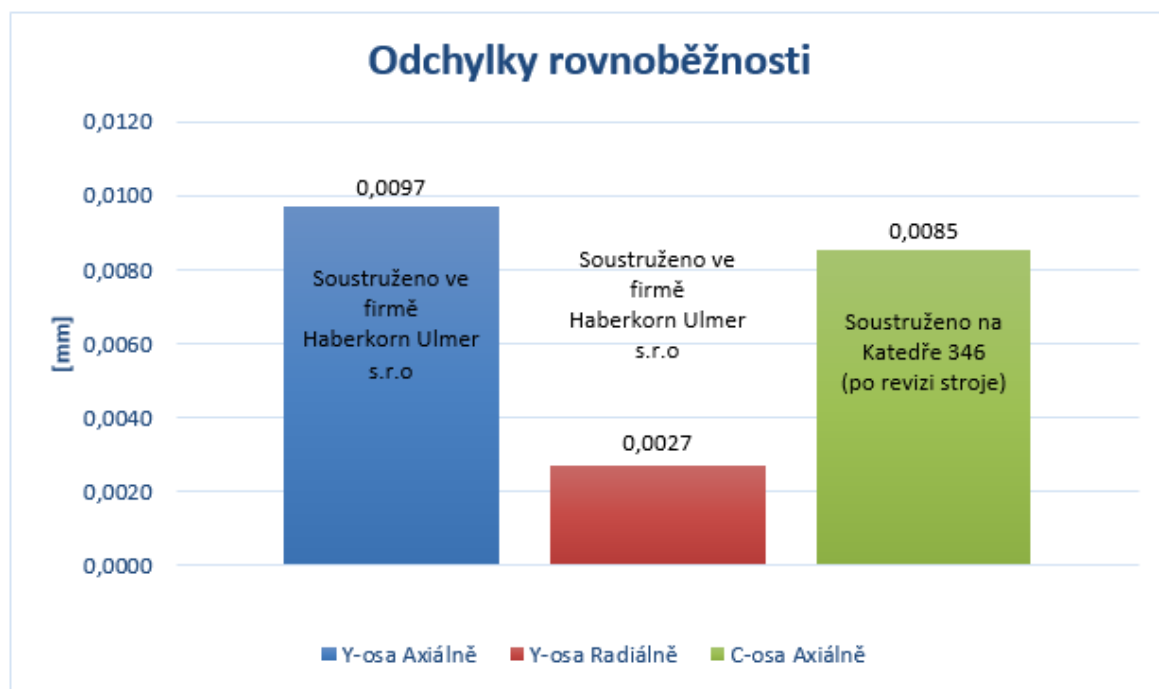
Zde je porovnáváno axiální soustružení pomocí rotační C osy a radiální soustružení pomocí Y osy.

(Axiální soustružení pomocí Y osy není bráno v potaz, z důvodu dosáhnutí horších výsledků na stejném stroji.)

- Soustružením pomocí Y oso bylo dosaženo menší odchylky kolmosti, než soustružením pomocí C osy a to o **2  $\mu\text{m}$  tedy o 47,6 %**

### 7.2.2 Porovnání odchyly rovnoběžnosti

Z grafu (obr. 7.8) je patrné, že nejlepších výsledků při obrábění rovinných ploch dosahujeme při radiálním frézování pomocí lineární Y osy. Touto metodou byla naměřena odchylna kolmosti pouze **2,7  $\mu\text{m}$** . Druhý nejlepší výsledek byl naměřen na rotační C ose **8,5  $\mu\text{m}$** . Nejhuře při obrábění kolmých ploch skončila metoda axiálního soustružení Y osou. Zde byla naměřena průměrná hodnota odchyly kolmosti **9,7  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



Obr. 7.8 Porovnání velikosti odchyly rovnoběžnosti pomocí soustružení s Y a C osou

#### Procentuální porovnání přesnosti soustružení pomocí C a Y osy:

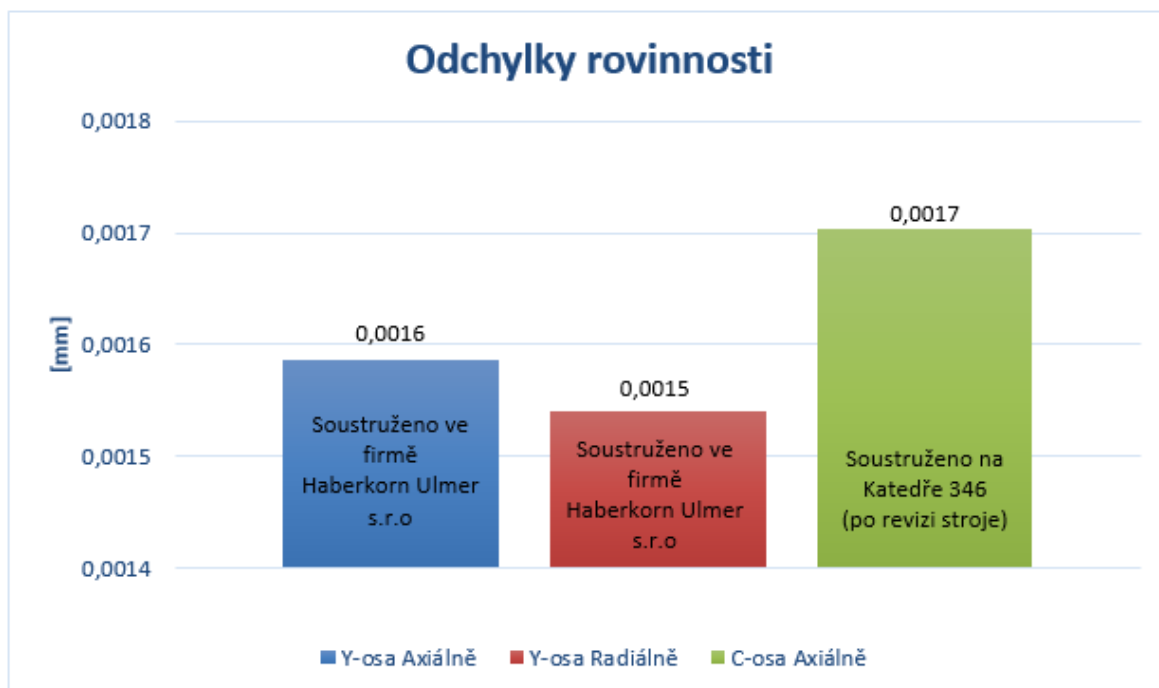
Zde je porovnáváno axiální soustružení pomocí rotační C osy a radiální soustružení pomocí Y osy.

(Axiální soustružení pomocí Y osy není bráno v potaz, z důvodu dosáhnutí horších výsledků na stejném stroji.)

- Soustružením pomocí Y oso bylo dosaženo menší odchyly rovnoběžnosti, než soustružením pomocí C osy a to o **5,8  $\mu\text{m}$  tedy o 68,2 %**

### 7.2.3 Porovnání odchylky rovinnosti

Z grafu (obr. 7.9) je patrné, že nejlepších výsledků při obrábění rovinných ploch dosahujeme při radiálním frézování pomocí lineární Y osy. Touto metodou byla naměřena odchylka kolmosti pouze **1,5  $\mu\text{m}$** . Druhý nejlepší výsledek byl naměřen metodou axiálního soustružení Y osou **1,6  $\mu\text{m}$** . Nejhorší při obrábění rovinných ploch skončila metoda axiálního soustružení C osou. Zde byla naměřena průměrná hodnota odchylky rovinnosti **1,7  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



Obr. 7.9 Porovnání velikosti odchylky rovinnosti pomocí soustružení s Y a C osou

#### Procentuální porovnání přesnosti soustružení pomocí C a Y osy:

Zde je porovnáváno axiální soustružení pomocí rotační C osy a radiální soustružení pomocí Y osy.

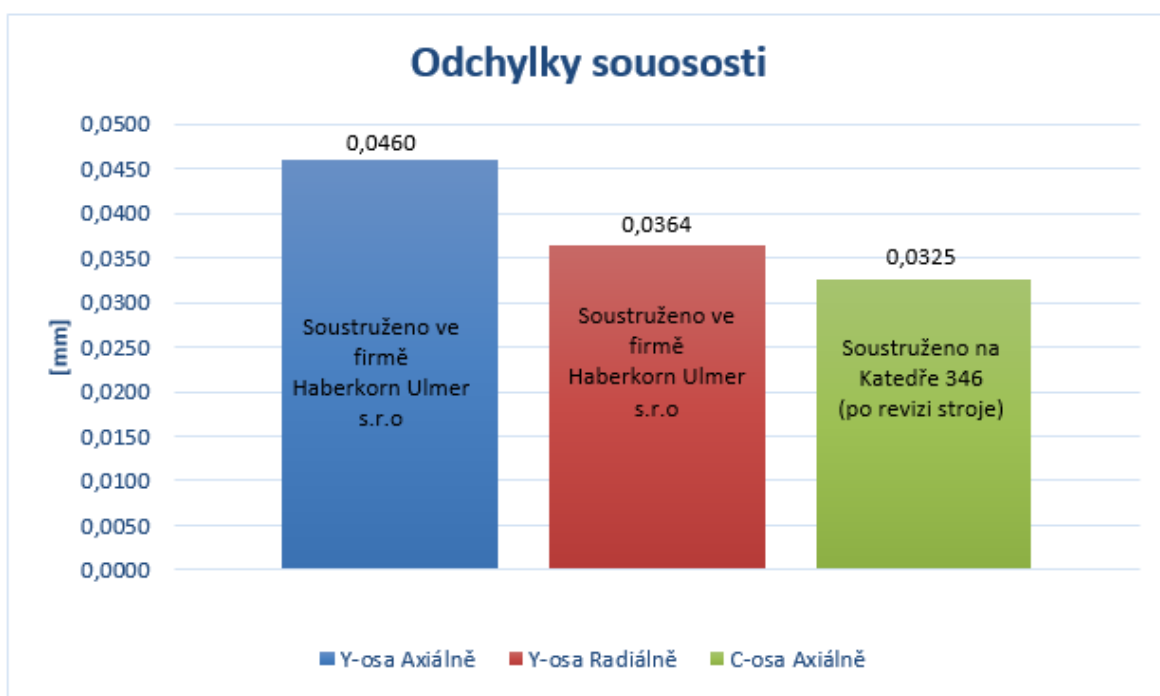
(Axiální soustružení pomocí Y osy není bráno v potaz, z důvodu dosáhnutí horších výsledků na stejném stroji.)

- Soustružením pomocí Y oso bylo dosaženo menší odchylky rovinnosti, než soustružením pomocí C osy a to o **0,2  $\mu\text{m}$  tedy o 11,8 %**



## 7.2.4 Porovnání odchyly souososti

Z grafu (obr. 7.10) je patrné, že nejlepších výsledků odchylek souososti dosáhneme při použití metody soustružení pomocí rotační C osy. Zde byla naměřena odchylka souososti **32,5  $\mu\text{m}$** . Druhý nejlepší výsledek byl naměřen pomocí radiálního soustružení Y osou **36,4  $\mu\text{m}$** . Nejhorší skončilo obrábění pomocí axiální Y osy **46,0  $\mu\text{m}$** . Výkres analyzovaného vzorku, se znázorněním měřených odchylek, viz příloha A.



Obr. 7.10 Porovnání velikosti odchyly souososti pomocí soustružení s Y a C osou

### Procentuální porovnání přesnosti soustružení pomocí C a Y osy:

Zde je porovnáváno axiální soustružení pomocí rotační C osy a radiální soustružení pomocí Y osy.

(Axiální soustružení pomocí Y osy není bráno v potaz, z důvodu dosažení horších výsledků na stejném stroji.)

- Soustružením pomocí C oso bylo dosaženo menší odchyly souososti, než soustružením pomocí Y osy a to o **3,9  $\mu\text{m}$  tedy o 10,7 %**

## **8. Závěry pro realizaci v praxi**

Závěry z této práce mohou být velice užitečné při výběru CNC soustružnicko-frézovacího centra, které bude splňovat námi zvolené požadavky.

### **8.1 Geometrické odchylky před a po revizi soustružnického centra**

Z analýzy vzorků vyrobených před a po revizi soustružnického centra vyplívá skutečnost, že se většina odchylek zmenšila, a to většinou v tisícinách milimetru. U odchylek souososti to však byli i setiny milimetru. Z těchto dat se dá konstatovat, že pravidelná údržba a kalibrace soustružnického centra se jednoznačně vyplatí.

### **8.2 Geometrické odchylky při použití Y a C osy**

Z vyhodnocených dat vyplývá skutečnost, že pro největší geometrickou přesnost jak z hlediska kolmosti, rovnoběžnosti i rovinnosti je nejpřesnější způsob soustružení pomocí lineární Y osy a to radiálním frézováním. Naopak nejmenší odchylky souososti byly naměřeny při soustružení pomocí rotační C osy.

Při volbě obráběcího centra je tedy důležité určit si priority, a to s ohledem na výrobu a technologie soustružení, které budou na tomto centru prováděny. Tedy pokud je cílem zaměřit výrobu na velice přesné frézování s minimálními geometrickými odchylkami kolmosti, rovnoběžnosti či rovinnosti, je vhodnou variantou zakoupit obráběcí centrum vybavené oproti standardním osám také lineární Y osou. Tato varianta bude sice dražší, řádově desítky tisíc, máme však záruku velice kvalitní geometrie opracovaného povrchu.

Další otázka, která se nabízí je ta, jestli stačí soustružnicko-frézovací centrum vybavené pouze standardními X, Z osami a rotační C osou. Tato varianta je ideální v případě, že se zaměřujeme především na geometrickou přesnost souososti. Nevýhody absence lineární Y osy viz kapitoly 1.2.2 a 1.2.3. Pokud jsme schopni se s těmito nedostatky vyrovnat, pak je tato varianta nejvhodnější a oproti centru vybaveného lineární Y osou i výrazně levnější.

## 9. Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval porovnáním přesnosti obrobených ploch při soustružení s C a Y osou. Shodou okolností jsem práci obohatil ještě o další významná data, přesněji porovnání přesnosti soustružnicko-frézovacího centra před kalibrací a po kalibraci.

Celkově bylo vyrobeno 18 zkušebních vzorků na dvou soustružnicko-frézovacích centrech, a to různými metodami soustružení, přesněji soustružení pomocí rotační C osy a lineární Y osy. Tyto vzorky byly následně podrobeny analýze přesnosti, a to z hlediska geometrických odchylek tvaru, směru a polohy. Tato analýza přesnosti byla prováděna na CMM Zeiss Prismo 7, následně byla data vyhodnocena.

Jak již bylo zmíněno v kapitole Závěry pro realizaci v praxi, analýza prozradila tyto skutečnosti. Kalibrace soustružnického centra se jednoznačně vyplácí. Naměřené hodnoty geometrických odchylek po kalibraci byly jednoznačně nižší než před kalibrací. Další skutečnost je ta, že největší geometrické přesnosti dosahujeme radiálním soustružením pomocí Y osy a to v řádech tisícín ale i stovek milimetrů. Jedinou nevýhodou soustružení pomocí této Y osy je větší odchylka souososti, než při použití rotační C osy. Proto záleží především na samotné firmě, pro které soustružnicko-frézovací centrum se rozhodne, a to hlavně s ohledem na výrobu aplikovanou pro daný stroj, požadovanou přesnost výroby a v neposlední řadě pořizovací náklady soustružnického centra.

## 10. Seznam použité literatury

- [1] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praxe*. Překl. M. Kudelka. 1. vyd. Praha : Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. Z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
- [2] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. – II. Doplněné vydání*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 138 s., ISBN 978-80-248-2278-4.
- [3] SADÍLEK, M.; SADILKOVÁ Z. *Počítačová podpora procesu obrábění*. VŠB – TU Ostrava, 2012, 149 s., ISBN 978-80-248-2770-4.
- [4] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [5] DMG MORI [online]. [cit. 19.3.2017]. dostupné z: [http://www.jarkovo.cz/img/download/tech\\_data\\_mori.pdf](http://www.jarkovo.cz/img/download/tech_data_mori.pdf)
- [6] Preciz, s.r.o. [online] [cit. 15.5. 2017] dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.1191>
- [7] SECO TOOLS [online] [cit. 10.5. 2017] dostupné z: [https://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Solid\\_carbide\\_end\\_mills/solidjabro2/general\\_machining/LR\\_Final\\_GB\\_General\\_Machining.pdf](https://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Solid_carbide_end_mills/solidjabro2/general_machining/LR_Final_GB_General_Machining.pdf)
- [8] Direct Industry [online] [cit. 10.4. 2017] dostupné z: <http://www.directindustry.de/prod/tsugami/product-17790-1713694.html>
- [9] HURCO [online] [cit. 11.3. 2017] dostupné z: <http://blog.hurco.com/blog/bid/281989/An-Introduction-to-Mill-Turn-Technology>
- [10] prumysl.cz [online] [cit. 11.3. 2017] dostupné z: <http://www.prumysl.cz/obrabeci-stroje-novinky-dmgmori-seiki-ve-pfrontenu-dil-1/>
- [11] KULČAR, Vojtěch. *Konstrukce osy C velkého soustruhu* - Brno, 2012. 32 s. [online] dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53846](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53846)
- [12] KOMÁREK, Miroslav. *Rotační upínací elementy nástrojů jako příslušenství obráběcích strojů*- Brno, 2012. 51 s. [online] dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39702](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39702)

- [13] SOLAŘ, Martin. *C osa u svislého soustruhu* - Brno, 2008. 64 s. [online] dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6815](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6815)
- [14] HUTYRA, MILAN A KOL. *Managemant jakosti*. Ostrava: VŠB – TUO, 2007, 209 s. ISBN 978-80-248- 1484-1
- [15] WERTH MESSTECHNIK GmbH [online] dostupné z: <http://www.werth.de/de/navigation/ueber-uns/unternehmen.html>
- [16] CHRISTOPH, R.; NEUMANN, H. J. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík,s.r.o., 2008.
- [17] Sláma Josef [online]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/snimaci-technologie.html>
- [18] KLUS, Pavel. *Geometrické tolerance*. [online]. Dostupné z: <http://www.pavelklus.cz/2015/09/04/geometricke-tolerance/>
- [19] KOČMAN, Karel. PROKOP, Jaroslav. *Technologie výroby II*. Brno, 2002. 64 s. [online]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf)